

Türkiye’de jeotermal enerji ve elektrik üretimi

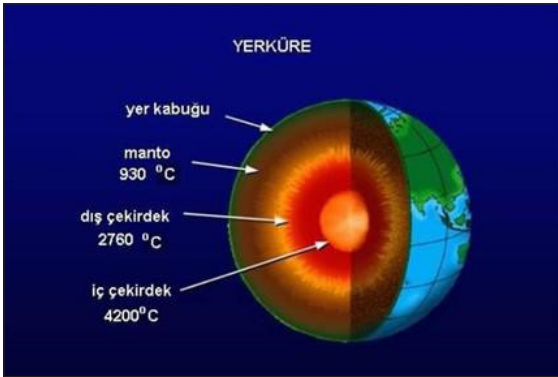
Selahattin KAHRAMAN¹

Giriş

İlk çağlardan beri jeotermal enerji insanların dikkatini çekmiş ve o dönemlerden itibaren ısınma, yiyecek pişirme, banyo ve sağlık amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Buna örnek; Pamukkale’deki sıcak su; Romalılar zamanında varlığı tespit edilmiş ve Hiyeropolis harabelerinde, binaların içinde ısıtma amaçlı kullanıldığı tahmin edilmektedir.

Jeotermal enerji; yerkürenin akkor halindeki çekirdek kısmında bulunan ısının yayılımı ile oluşan ve yerkabuğuna kadar yayılan ısı enerjisidir ve jeotermal gradyanı oluşturur (Şekil 1). Bu ısı enerjisi; zaman zaman kabuk içerisine sokulan ve mantodan kaynaklanan magma intrüzyonları ile kabuk içerisinde ısı anomalisi yaratırlar, derinlere süzülerek dolaşan meteorik sular yardımı ile bu ısı alınabilir veya ısınmış ve permeabilitesi zayıf kayalar içerisine sondajla su basılarak tekrar başka bir sondajla alınabilir (sıcak kuru kaya).

Jeotermal enerji kaynağı; yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde anomali yaratacak şekilde birikmiş ısının oluşturduğu, sıcaklıkları sürekli olarak bölgesel atmosferik ortalama sıcaklığın üzerinde olan ve çevresindeki normal yeraltı ve yerüstü sularına göre daha fazla erimiş mineral, çeşitli tuzlar ve gazlar içerebilen sıcak su ve buhar olarak tanımlanabilir.



Şekil 1- Yerküreyi oluşturan katmanlar ve sıcaklıkları.

Ayrıca, bazı alanlarda bulunan sıcak kuru kaya (Hot Dry Rock) da akışkan içermemesine rağmen jeotermal enerji kaynağı olarak nitelendirilirler. Son yıllarda ısı pompaları (heat pumps) da jeotermal enerji olarak kabul edilmektedir.

1. Jeotermal Sistemin Kaynağı

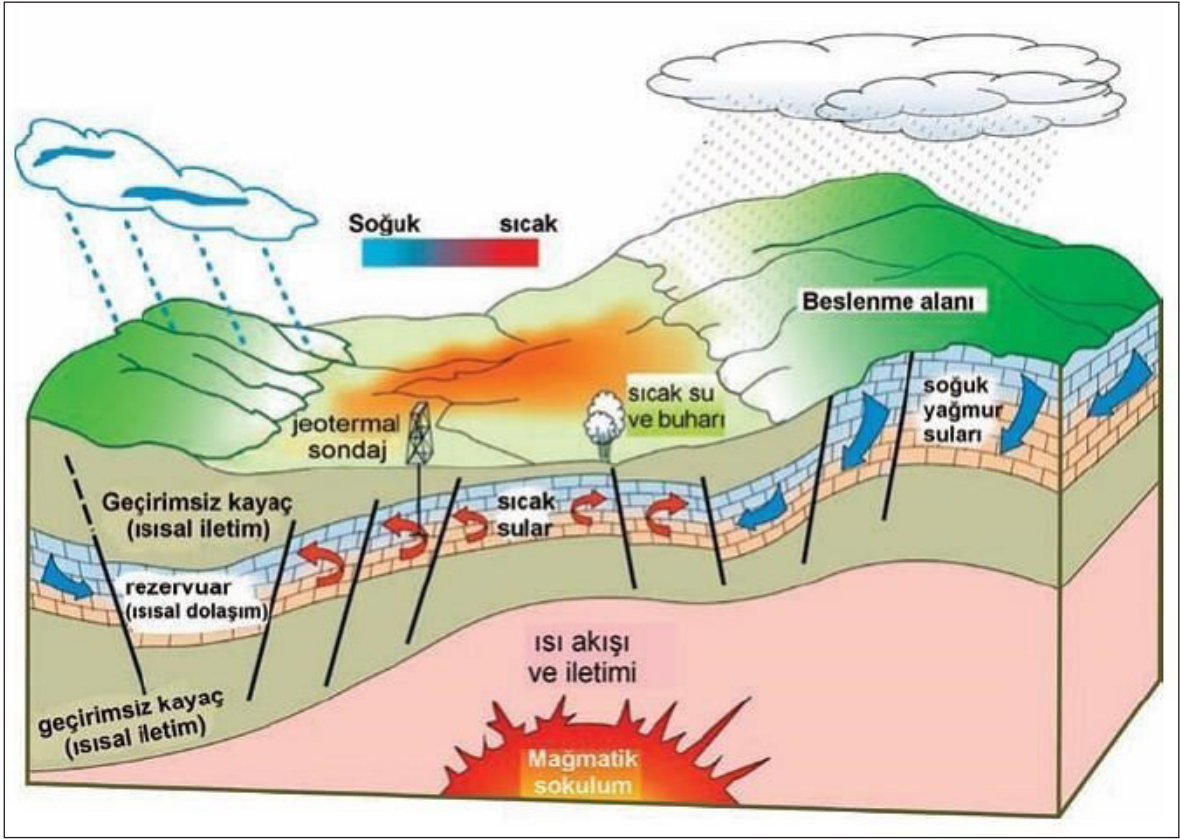
Jeotermal sistem üç ana unsurdan oluşmaktadır; ısı kaynağı, rezervuar ve ısıyı taşıyan akışkan. Isı kaynağı; yüksek sıcaklıklı (>600 °C) ve yüzeye yakın kısımlara ulaşabilen (5-10 km) magmatik sokulumlar olabileceği gibi, düşük sıcaklıklı sistemlerde de derinlikle birlikte artan normal sıcaklık (jeotermik gradyan) ortalama 2,5-3 °C/100 m olabilir (Şekil 2). Rezervuar ise ısıyı taşıyan sıvının devirdaim edebileceği çatlaklı/geçirgen kayalardır. Rezervuarların üzerinde genellikle geçirimsiz tabakalar bulunmaktadır. Jeotermal akışkan ise genellikle meteorik sudur ve rezervuarda sıcaklık ve basınca bağlı olarak buhar veya sıvı haldedir. Jeotermal su genellikle bazı kimyasal maddeler ve gazlar (CO₂, H₂S gibi) içerir.

Jeotermal sistemin mekanizması sıvının ısıyı iletimi üzerinedir. Konveksiyon akım (ısı iletimi) ısınma nedeniyle oluşur ve sonuçta sistemdeki sıvının termal genişlemesine neden olur. Düşük yoğunluklu ısınmış sıvı, sistemde yükselme eğilimindedir ve sistemin kenarlarından gelen yüksek yoğunluklu soğuk su ile yer değiştirir. Doğal olarak konvensiyonel akım sisteminde; alt kısımlarda sıcaklık azalma eğiliminde iken üst kısımlarda sıcaklık artma eğilimindedir.

Jeotermal kaynakların sınıflandırılmasında en çok kullanılan yöntem jeotermal sıvısının içerdiği entalpidir. Entalpi, sıvının ısı (termal enerji) içeriğini gösterir ve onun değeri hakkında kaba bir değer verir. Jeotermal kaynaklar birkaç kritere göre düşük, orta ve yüksek entalpili (veya sıcaklıklı) olarak sınıflandırılmaktadır. Diğer bir sınıflama ise, su yoğunluklu jeotermal sistem ve buhar yoğunluklu jeotermal sistemdir.

Jeotermal kaynak araştırması; jeolojik etüt, jeofizik etüt ve hidrojeolojik etüt gibi ana çalışmalardan oluşmaktadır. Bu çalışmalar neticesinde, jeotermal enerji araştırma ve üretim kuyularının yerleri tespit edilir. Sondaj kuyularının açılması (Şekil 3) ve bu kuyuların testleri, jeotermal enerji araştırmalarının son aşamasıdır. Bu sondajlar jeotermal rezervuarın gerçek karakteristiğini ve sahanın potansiyelini ortaya çıkarır.

¹ Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ege Bölge Müdürlüğü, İzmir



Şekil 2- İdeal bir jeotermal sistem modeli.



Şekil 3- Jeotermal sondaj kuyusu açan sondaj makinasından bir görüntü (Jeotermal Elektrik Santral Yatırımcıları Derneği, JESDER, 2021).

Jeotermal Kaynaklar ile;

- 1- Elektrik enerjisi üretimi,
- 2- Merkezi ısıtma, soğutma (air-conditioning), sera ısıtması vb.,
- 3- Endüstriyel amaçlı kullanım, proses ısısı, kurutma vb.,

- 4- Kimyasal madde ve mineral, karbondioksit, gübre, lityum, ağır su, hidrojen vb. üretimi,
- 5- Kaplıca amaçlı kullanım (termal turizm),
- 6- Düşük sıcaklıklarda (30 °C) kültür balıkçılığı vb.,
- 7- Mineralli su olarak içilerek kullanımı, gerçekleştirilmektedir.

Yüksek sıcaklıklı jeotermal kaynakların (>150 °C) en önemli kullanım alanı elektrik üretimidir. Düşük ve orta sıcaklıklı jeotermal kaynaklar (<150 °C) çok farklı kullanım alanlarına sahiptir. Klasik Lindal diyagramı farklı sıcaklıklara bağlı olarak jeotermal kaynağın kullanılabilir alanlarını göstermektedir. Bu diyagrama son yıllarda 85 °C'nin üzerindeki jeotermal kaynakların çift çevrim (binary cycle) santrallerinde elektrik üretiminde kullanılması da eklenebilir.

2. Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi

2.1. Jeotermal Sahaların Sınıflandırılması

Ülkelere ve kökenlerine göre değişik sınıflandırmalar olmasına rağmen jeotermal enerji

yaygın olarak kullanılan sıcaklık içeriğine göre, ülkemiz koşullarına göre kabaca üç gruba ayrılır.

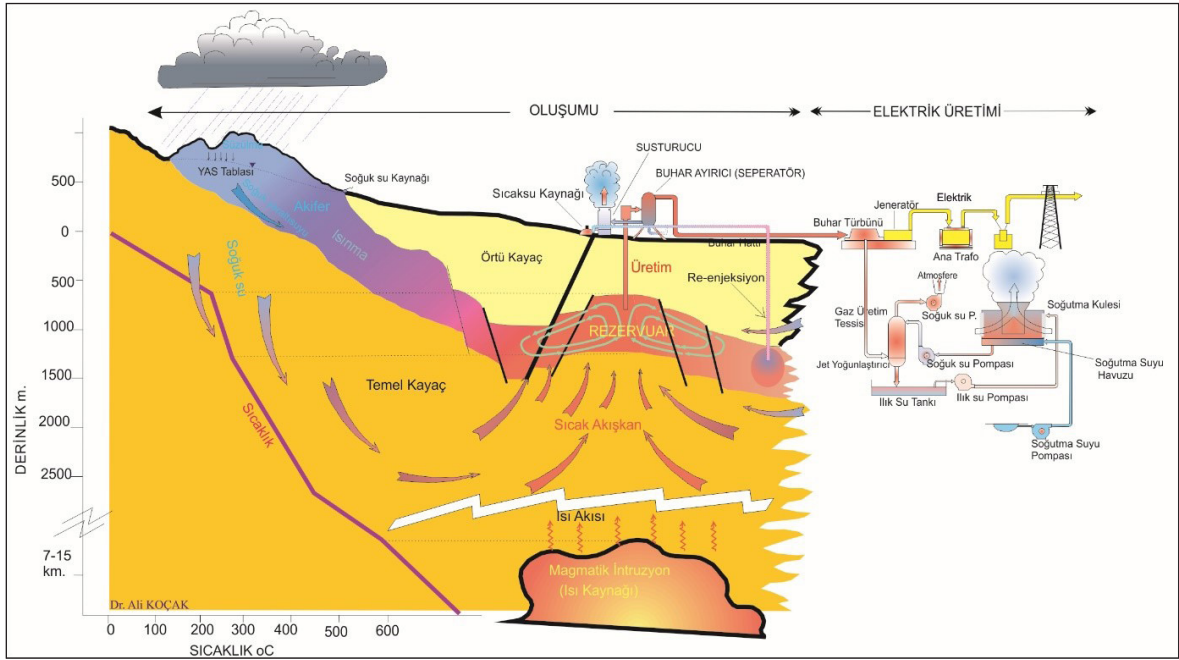
- Düşük entalpili sahalar (20-70 °C)
- Orta entalpili sahalar (70-150 °C)
- Yüksek entalpili sahalar (150 °C den yüksek).

Bu sıcaklık eşik değerleri, yüksek sıcaklıklı (entalpili) jeotermal sahalarla sahip birçok ülkede; düşük entalpili <150 °C, yüksek entalpili >150 °C şeklinde de sınıflanabilmektedir.

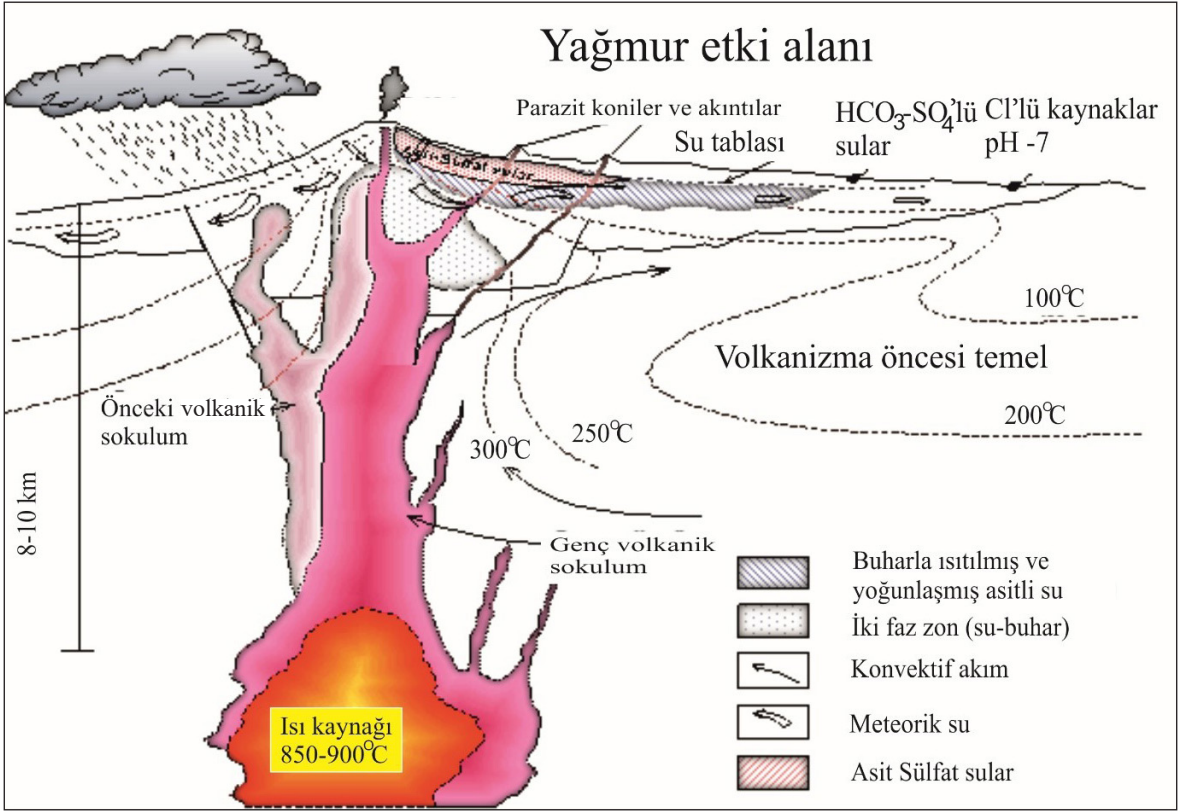
Bu sınıflamanın dışında, rezervardaki etkin akışkan (buhar veya su) durumuna, kimyasal bileşimine göre sistemin modelini oluşturmak için ve araştırmanın niteliğine göre daha değişik amaçlı sınıflamalar yapılabilmektedir.

Şekil 4'te, bir jeotermal sistemin ana öğelerinin idealize edilmiş şematik şekli görülmektedir. Meteorik sularla beslenen ana akifer ve temel kayalar, derinlerde bulunan henüz soğumasını tamamlamamış bir intrüzyondan yayılan, ağırlıklı olarak konduktif sıcaklık nedeniyle ısınırlar ve çatlaklarında dolaşan

akışkanları da ısıtırlar. Isınan bu akışkan yoğunluk farkı nedeniyle yukarı çıkma eğilimindedir ve permeabilitesi çevresine göre daha yüksek zayıflık zonlarından yukarı doğru (upflow) çıkarlar ve akifer özellikli rezervuar kayalar içerisinde depolanırlar. Şemanın sol tarafında bulunan sıcaklık eğrisi, sondaj noktasının bulunduğu noktadan magmatik kütleyle doğru bir düşeyden elde edilecek sıcaklık grafiğinin sistemin düşey kısımlarına karşılık gelen şematize edilmiş şeklidir. Sondajdan itibaren, sağ tarafta ise, çıkarılan akışkanın elektrik üretimi elde edilmesinde kullanılan değişik ekipmanlardaki geçiş sırası akım şemasıdır. Şekil 5'te ortaç ve dasitik bileşimli bir volkanizmanın oluşturduğu jeolojik yapı içerisinde, ısı kaynağı, eski ve yeni baca oluşturan sokulumlar ve bunların oluşturduğu şematik ısı anomalisi modeli, beslenmenin konumu, dışa akış (outflow) şekli, yüze yakın koşullarda oluşan farklı bileşimlerdeki jeotermal rezervuar zonları ile oluşması muhtemel iki fazlı zonun konumları görülmektedir.



Şekil 4- Volkanik olmayan alanlarda jeotermal enerji oluşumunu gösteren şema.



Şekil 5- Andezitik - dasitik bileşimli tipik bir aktif adayı volkanizması ile ilgili muhtemel hidrotermal-jeotermal sistemin genel şeması (Henley and Ellis, 1983'den revize edilmiştir).

2.2. Jeotermal Elektrik Üretimi

1904'ten beri İtalya'da Lardello sahasından elektrik üretimi yapılmasına rağmen, dünyada jeotermal enerjiden elektrik üretilmesine yönelik çabaların artması 1950'li yılları bulmuştur. Buhar-baskın bir sahadan ilk elektrik üretimi İtalya'da, su-baskın bir sahadan ilk elektrik üretimi de Yeni Zelanda'da 1950'lerde olmuştur.

Günümüzde, klasik yöntemlerle (tek buharlaştırmalı türbün sistemi) sıcaklığı 150-180 °C ve üzerinde olan akışkanlar elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bunun yanında yeni geliştirilmiş yöntemlerle (Binary Cycle; izobütan ve freeon gazı kullanarak) sıcaklığı 80 °C kadar olan akışkanlardan da elektrik üretilebilmektedir.

Elektrik gücü üretimi şu şekilde gerçekleşmektedir;

- Kuru buharın doğrudan kullanımı,
- Sıcak suyun buhara dönüşümü (Flashing),
 - Yüzye dönüşüm,
 - Yeraltında dönüşüm,
- Binary ve Hybrid çevrimler,
- Yeni gelişen Tekkuyu dönüşümleri

Jeotermal santral tipleri ise;

Isı Kaynağı	Üretim Modu
Kuru Buhar	Buhar Türbünü
Sıcak Su (T > 180 °C)	Buhar Türbünü
Sıcak Su (T < 150 °C)	Kontur Çevrim (Binary Cycle)
Sıcak Su (Orta Tuzlulukta)	Melez Çevrim (Hybrid Cycle)
Sıcak Brine (Basınçlı)	Kontur Çevrim (Binary Cycle)
Sıcak Brine (Flashed)	Vurmalı veya Sıkıştırılmalı Türbün Helezon Dönüşlü Expander Kanatsız Türbün

2021 yılı itibarıyla Türkiye'deki jeotermal elektrik santrallerindeki (JES) kurulu güç 1666 MWe'tir. 2021 Temmuz ayı verilerine göre JES kurulu Güç Oranı; %2, JES Üretim Oranı ise % 3 olarak verilmektedir (JESDER, 2021). Türkiyede Jeotermal Elektrik Santraline örnek olarak Şekil 6'daki resim verilebilir.



Şekil 6- Türkiye’de Jeotermal Elektrik Santraline örnek.

Jeotermal ile elektrik üretiminde kurulu güç sıralaması; ABD 3700 MWe, Endonezya 2289 MWe, Filipinler 1918 MWe ve Türkiye 1666 MWe’dir.

Türkiye’de lisanslı santral sayısı toplamda 68 olup, bu santrallerin illere göre dağılımı; Aydın 33 santral, Manisa 16 santral, Denizli 13 santral, Çanakkale 4 santral, İzmir 1 santral ve Afyon 1 santral şeklindedir.

Türkiye’de jeotermal elektrik üretimi için 695 adet jeotermal kuyu bulunmaktadır. JESDER’e göre 367 adet üretim kuyusu geri kalanı reenjeksiyon kuyusu olarak kullanılmaktadır. Mevcut santrallerde ortalama 2.500 çalışan istihdam edilmektedir.

Genelde elektrik üretimi, jeotermal kaynağın karakteristiğine bağlı olarak üç tip santralde yapılmaktadır.

1. Kuru buhar santralleri; türbünü döndürmek için kuyudan üretilen kuru buhar direk olarak kullanılır.
2. Flaş buhar santralleri; yüksek basınçla kuyudan gelen akışkan düşük basınçlı separatörlerde su ve buhar olarak ayrılır ve ayrıştırılan buhar ile türbünün döndürülmesi sağlanır.
3. Binary cycle (çift çevrim) santralleri; jeotermal akışkanın sıcaklığından faydalanılarak sudan daha az buharlaşma sıcaklığına sahip akışkan eşanjörde (heat-exchanger) buharlaştırılır ve buharlaşan bu akışkan ile türbünün döndürülmesi sağlanır.

Jeotermal çift-çevrim teknolojisi; düşük ve orta sıcaklıklı jeotermal kaynaklardan ve atık ısıdan elektrik enerjisi üretmek amacıyla geliştirilmiştir.

Üzerinde tek buhar ayrıştırıcı (single flash) elektrik santrali kurulu alanlarda; buhar ayırıcılar, bu atık ısı kaynaklarından en fazla bilinendir. Örneğin: Denizli-Kızıldere’de kurulu bulunan tek buharlaştırıcı jeotermal santralde, 140 °C ve 700 ton/saat jeotermal akışkan buhar ayırıcılarından dışarı atılmaktadır. Su buharıyla karşılaştırıldığında daha düşük kaynama noktası ve daha yüksek buhar basıncına sahip bir akışkan, sistemin ikinci çevriminde kullanılır. Bu ikinci akışkan, normal Rankin çevriminde işletilir.

Çift çevrimli sistemler, uygun ikincil akışkanlar kullanılarak 85-170 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışacak şekilde tasarlanabilirler. Üst çalışma sıcaklığı, organik ikincil akışkanların termal olarak bozuma sıcaklıkları tarafından belirlenir.

Belirlenen kapasite için, ısı eşanjörü büyüklüğünün pratik olmaması ve parazitik yüklerin (sirkülasyon pompası yükleri gibi), üretimin büyük bir oranını tüketmesi gibi pratik ve ekonomik nedenler alt çalışma sıcaklığını belirler. Türbinde genişmeden önce, daha düşük bir basınç ve sıcaklıkta, jeotermal akışkanın ısı, ikincil (çalışan) akışkana ısı eşanjörleri tarafından aktarılır ve ikincil akışkanın ısınması ve buharlaşması sağlanır.

Çift çevrim elektrik santralleri; suyun içerdiği ısı enerjisini mekanik enerjiye ve sonrada bir jeneratör vasıtası ile elektrik enerjisine çevirirler. Çalışan akışkan; kapalı bir devrede yüksek sıcaklıklı jeotermal akışkan ile soğutma suyundan ibaret iki ısı kaynağı arasında bir termodinamik motor çevriminde çalışır. Çalışan akışkan genellikle izobütan gibi bir hidrokarbon, R¹² gibi bir soğutma gazı veya CO₂ gazıdır.

Dünyadaki uygulamalarda çift çevrimli santrallerin yapım maliyetleri (jeotermal alanın geliştirilmesi ile ilgili giderler hariç) 1500–2000 \$/Kw arasında değişmektedir. Bu santrallerden üretilen elektriğin maliyeti ise 0.04 \$ ile 0.1 \$ arasında değişmektedir.

3. Sonuç

Jeotermal enerji diğer enerji türlerine göre temiz enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Çünkü, jeotermal santrallerde daha az karbondioksit (kömür ve petrol santralleri 1000-2000 kez daha fazla üretir) ve çok az miktarda da sülfüroksit gazı atmosfere salınır. Buhar santralleri çoğunlukla buhar emisyon eder. Binary cycle santralleri kapalı sistem olduğundan herhangi bir gaz atmosfere salınmaz.

İnsanlar tarafından üretilen veya başka bir şekilde dönüştürülen enerjinin çevresel etkilerinin olması kaçınılmazdır. Dolayısıyla, elektrik üretimi veya

diğer nedenlerle kullanılan derin jeotermal suların da çevreye geniş bir oranda etkisi vardır. Bu etkiler; yüzeyde oluşan çökmelerden (tasman), jeotermal akışkanın oluşturduğu doğal güzelliklerdeki (Pamukkale travertenleri) tahribatlara kadar değişebilmektedir. Bunların yanında, jeotermal sıvının içerdiği bor, cıva, arsenik, kurşun, amonyak, antimuan, lityum, karbondioksit, hidrojen sülfür ve tuz çevreyi olumsuz şekilde kirletmektedir. Fakat, santralde kullanılan akışkanın tekrar rezervuara enjekte edilmesiyle çevreye verilen zarar minimuma indirilebilir.

Değinilen Belgeler

JESDER. (21.11.2021). *jesder.org*. JESDER: <http://jesder.org> adresinden alındı.

Henley, R.W. and Ellis A.J. (1983) Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth-Sci. Rev.*, 19, 1–50.